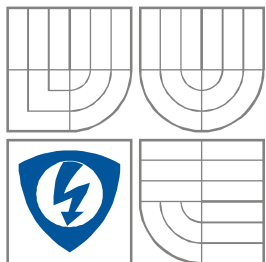


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

Laserový zdroj s optovláknovým výstupem

Laser source with fiber-optic output

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Tomáš Roupec

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing, Petr Drexler, Ph.D.

BRNO, 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor Elektronika a sdělovací technika
Ústav radioelektroniky

Student: Tomáš Roupec
Ročník: 3

ID: 164774
Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Laserový zdroj s optovláknovým výstupem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte s principy polovodičových laserů a se zásadami jejich provozování a napájení s důrazem na stabilitu generovaného optického výkonu a bezpečnost laseru. Prostudujte problematiku navazování záření polovodičového laseru do optických vláken a jeho šíření. Na základě získaných poznatků navrhněte řešení zdroje stabilního laserového záření, který umožňuje připojení optického vlákna.

Realizujte potřebné dílčí části laserového zdroje. Laserový zdroj zkompletujte do podoby laboratorního přístroje a měření zjistěte jeho parametry.

DOPORUČENÁ LITERATURA:


- [1] JOHNSON, M. Photodetection and Measurement: Maximizing Performance in Optical Systems. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [2] iC-Haus GmbH. Discrete vs. Integrated - Driving laser diodes with discrete or integrated circuits? Rev A3. 2007 [cit. 16. 5. 2016], Dostupné z: http://ichaus.de/upload/pdf/Apl3_a3es.pdf.

Termín zadání: 5. 2. 2018

Termín odevzdání: 24. 5. 2018

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Drexler, Ph.D.




prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá polovodičovým laserem, jeho částmi a způsobem práce. Taktéž jsou popsány optická vlákna a jejich možnost propojení s laserem. Je popsána problematika napájení a chlazení laserové diody, na čemž je navržena možnost zapojení proudového zdroje laserové diody. Na konci práce je navržen laserový budič s napájením a příslušnými obvody.

KLÍČOVÁ SLOVA

Laser, polovodičový laser, optické vlákno, navazování světla do vlákna

ABSTRACT

This term project deals with the semiconductor laser components, and how it works. Additionally, there is an optical fiber ant networking with laser. It is written of power and cooling laser diodes and such information suggested the possible involvement of the laser diode. At the end of this work is designed laser's exciter with charging and adjacent circuits.

KEYWORDS

Laser, semiconductor laser, optical fiber, fiber coupling

Roupec, T. *Laserový zdroj s optovláknovým výstupem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2018. 37 s., 7 s. příloh. Bakalařská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Drexler, Ph.D

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářský projekt na téma Laserový zdroj s optovláknovým výstupem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedeného bakalářského projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto bakalářského projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat doc. Ing, Petr Drexler, Ph.D. za pomoc a rady při tvorbě mého bakalářské práce.

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| Seznam obrázků | ix |
| Seznam tabulek | x |
| Úvod | 1 |
| 1 PRINCIP LASERU A LASEROVÉHO ZÁŘENÍ | 2 |
| 1.1 Laser | 2 |
| 1.2 Laserové záření | 3 |
| 2 POLOVODIČOVÉ LASERY | 5 |
| 2.1 Generace laserového záření v polovodiči laseru | 5 |
| 2.2 Typy a struktury laserových diod | 6 |
| 2.2.1 Homostrukturní lasery | 6 |
| 2.2.2 Heterostrukturní lasery | 6 |
| 2.2.3 Lasery s rozprostřenou zpětnou vazbou | 7 |
| 2.2.4 Hranou a plošně vyzařující lasery | 7 |
| 2.3 Pouzdření laserových diod | 8 |
| 2.4 Seznámení se s problematikou napájení LD a stabilizací výkonu | 9 |
| 2.5 Řízení LD | 10 |
| 2.5.1 Integrované řešení zapojení | 10 |
| 2.5.2 Diskrétní řešení zapojení | 11 |
| 2.6 Problematika chlazení LD | 12 |
| 3 OTICKÁ VLÁKNA | 14 |
| 3.1 Princip optických vláken | 14 |
| 3.2 Výroba optických vláken | 15 |
| 3.3 Ztráty v optických vláknech | 16 |
| 4 PROBLEMATIKA VAZBY LASER - OPTICKÉ VLÁKNO | 17 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5 | NÁVRH PŘÍPRAVKU LASEROVÉHO ZDROJE A JEHO NAPÁJENÍ | 18 |
| 5.1 | Blokové schéma | 18 |
| 5.2 | Zdroj napájení | 18 |
| 5.3 | Řízení napájení akumulátoru a signalizace nabíjení a nabití akumulátoru | 19 |
| 5.4 | Akumulátor | 21 |
| 5.5 | Automatické odpojení a signalizace vybití akumulátoru | 21 |
| 5.6 | Řízení laserové diody | 22 |
| 5.7 | Měření proudu procházející přes LD | 26 |
| 5.8 | Laserová dioda a chlazení | 26 |
| 6 | Závěr | 29 |
| | Literatura | 30 |
| | Seznam symbolů, veličin a zkratk | 31 |
| | A. Návrh zapojení | 32 |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | | |
|------------|---|----|
| Obr. 1.1 | Zjednodušený model laseru [1]..... | 2 |
| Obr. 1.2 | Spontánní emise fotonu [2]..... | 3 |
| Obr. 1.3 | Stimulovaná emise fotonu [2]..... | 4 |
| Obr. 2.1 | Absorpce fotonu v polovodiči [2]..... | 5 |
| Obr. 2.2.1 | Struktura homostrukturního laseru [3]..... | 6 |
| Obr. 2.2.2 | Struktura SHL a DHL [3]..... | 7 |
| Obr. 2.2.3 | Struktura laseru s rozprostřenou zpětnou vazbou [3]..... | 7 |
| Obr. 2.2.4 | Vyzařování hranovou a plošnou LD [3] | 8 |
| Obr. 2.3.1 | Pouzdro laserové diody [3]..... | 8 |
| Obr. 2.3.2 | Pouzdro laserové diody s čočkou [3]..... | 9 |
| Obr. 2.4 | Voltampérová charakteristika diody [9]..... | 9 |
| Obr. 2.5.1 | Teoretické zapojení LD s IC-WK[15]..... | 11 |
| Obr. 2.5.2 | Teoretické diskrétní zapojení budiče LD | 12 |
| Obr. 2.6 | Peltierův článek [9] | 13 |
| Obr. 3.1 | Šíření světla v optickém vláknu [4] | 13 |
| Obr. 3.2 | Vystupující a úplně odražené paprsky ve světlovodu [4]..... | 14 |
| Obr. 3.3 | Metoda dvojitého kelímku a VAD metoda [5]..... | 16 |
| Obr. 4.1 | Použití spojné čočky a systému čoček [7]..... | 17 |
| Obr. 4.2 | Tvarované konce vláken [7]..... | 17 |
| Obr. 5.1 | Blokové schéma přípravku..... | 18 |
| Obr. 5.3.1 | Zapojení UC3906N | 19 |
| Obr. 5.3.2 | Zapojení MAX8211 pro signalizaci nabití akumulátoru..... | 20 |
| Obr. 5.5 | Zapojení MAX8211 pro odpojení akumulátoru..... | 21 |
| Obr. 5.6.1 | Obvodové zapojení integrovaného napětového budiče LD | 22 |
| Obr. 5.6.2 | Obvodové zapojení integrovaného napětového budiče LD2 | 23 |
| Obr. 5.6.3 | Průběhy proudu na LD | 24 |
| Obr. 5.6.4 | Průběhy proudu a optického výkonu..... | 25 |
| Obr. 5.7 | Zapojení LTC6101 | 26 |
| Obr. 5.8.1 | Fiber-pigtail LD[8]..... | 27 |
| Obr. 5.8.2 | Piny na LPS-635-FC [8]..... | 28 |

SEZNAM TABULEK

| | | |
|----------|--|----|
| Tab. 3.1 | Nečistoty v optickém vlákně..... | 16 |
| Tab. 5.8 | Optický výkon s procentuální fluktuací výkonu..... | 26 |
| Tab. 5.8 | Základní parametry LPS-635-FC..... | 27 |

ÚVOD

Bakalářská práce se zabývá tématem o laserových zdrojích s optovláknovým výstupem. Jsou zde popsány nejčastější problémy a jejich možná řešení u laseru a optického vlákna. Hlavní témata řešená v této práci jsou bezpečné napájení a nutnost chlazení laserové diody včetně jejího navázání s optickým vláknem. První část práce se zabývá teoretickým rozbořem, kde je popsána funkce a jednotlivé části laseru. V rámci teorie je také popsán polovodičový laser a optické vlákno, kterých bude využito v rámci následného testování. Dále jsou popsány problémy při napájení a chlazení laserové diody. Poslední praktická část je věnována možnému návrhu bezpečného laserového zdroje a jeho sestavení.

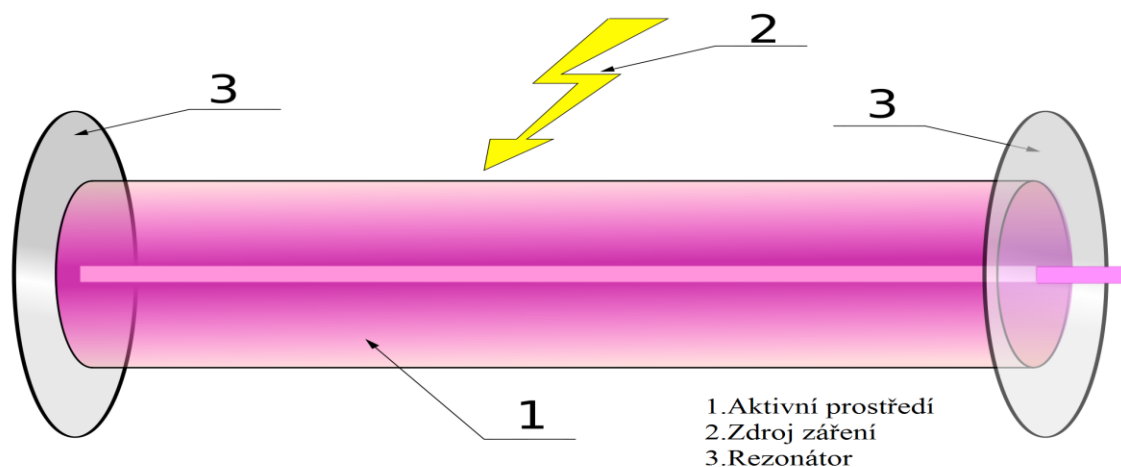
Práce je rozdělena do několika kapitol. V 1. až 2. kapitole jsou popsány informace o laserech a polovodičových laserech. Kapitoly 3. až 4. obsahují vysvětlení, jak pracuje a jak se dá přenést laserový paprsek do optického vlákna. Pátá kapitola začíná řešit samotné zapojení, parametry laserové diody, které budou použity v rámci zapojení. Na závěr je uveden možný návrh zapojení laserového budiče.

1 PRINCIP LASERU A LASEROVÉHO ZÁŘENÍ

1.1 Laser

Laser je zkratka anglických slov *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, což v překladu znamená zesilování světla stimulovanou emisí záření. Laser je zdroj elektromagnetického záření, které je na rozdíl od obyčejného světla koherentní a monochromatické, má vysokou zářivost a směrovost.

Laser se skládá ze tří hlavních částí. Zaprvé to je aktivní prostředí, zadruhé zdroje záření a nakonec rezonátor. Zdroj záření má za úkol dodat energii elektronům, které se nacházejí v aktivní oblasti tak, aby se mohly přesunout z nižší energetické hladiny do vyšší. Z této vyšší hladiny se po jisté době elektrony vrátí zpátky na svou původní energetickou hladinu, přičemž vznikne elektromagnetické záření. Nakonec v rezonátoru dochází k odrazům paprsku a zesílení světla. Rezonátor se obvykle skládá ze dvou rovinných zrcadel, přičemž jedno z nich je nepropustné a druhé polopropustné.



Obr. 1.1 Zjednodušený model laseru [1]

1.2 Laserové záření

Jak již bylo řečeno v předchozí části kapitoly, tak laserový paprsek je koherentní a monochromatický s vysokou zářivostí a směrovostí.

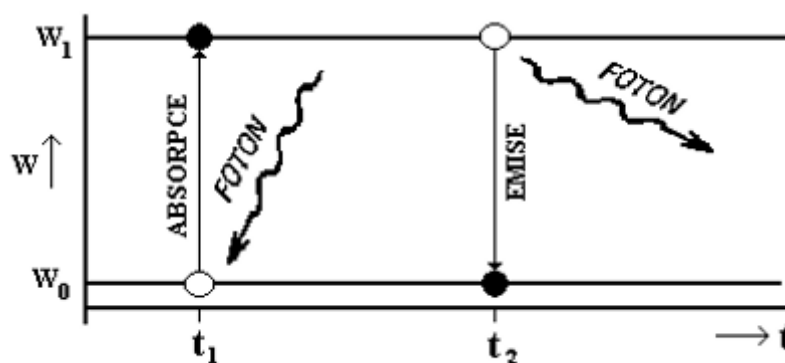
Koherencí je myšleno to, že jsou dva kmitavé průběhy synchronní, což znamená, že záření má stále stejnou vlnovou délku a stejnou fázi odpovídajících elektromagnetických vln. U elektromagnetické vlny jsou rozlišovány dva typy koherence, a to časová či prostorová. Prostorová koherence je závislá na vyzařovací ploše a časová koherence je ovlivněna monochromaticností světla. Taktéž se vyskytuje úplná prostorová koherence, což je děj, kdy je fázový rozdíl vlny ve dvou bodech nulový v kterémkoliv časovém okamžiku. Obdobně tak úplná časová koherence je určena stejným rozdílem fází v časovém okamžiku v jednom bodě.

Monochromatický je slovo pocházející z řeckého *mono-chromos*, jenž v překladu znamená jedna barva. U laseru by to v dokonalém případě znamenalo, že by měl pouze jednu vlnovou délku neboli jednu frekvenci. Ve skutečnosti se ale jedná o úzký rozsah frekvencí.

Zářivost je definována jako zářivý tok vyzařený z jednotkového povrchového zdroje do jednotkového prostorového úhlu. Díky vysoké směrovosti se může dosáhnout vysoké hodnoty zářivosti.

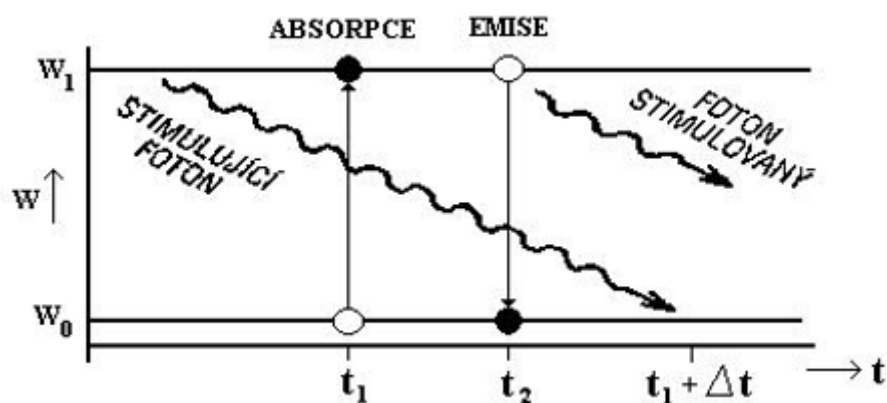
Samotné světlo vzniká, pokud je elektronu v aktivním prostředí dodána dostatečná energie k přesunu na vyšší energetickou hladinu. V této hladině vydrží elektron pouze krátkou dobu 10^{-3} až 10^{-7} sekundy [2], a poté se vrátí zpět na původní hladinu, přičemž vyžáří foton. Energie k přesunu elektronu může být dodávána v různých podobách jako tepelná, světelná a elektrická.

Emise fotonů se může rozdělit na dva případy: buď spontánní nebo stimulovanou emisi. Při spontánní emisi se elektrony ve vyšší energetické hladině vrací náhodně, jak je znázorněno na obr. 1.2. Jak absorbovaný tak emitovaný foton má stejnou frekvenci. Tento děj je nahodilý a výsledné světlo je nekoherentní [2].



Obr.1.2 Spontánní emise fotonu [2]

Stimulovaná emise nastává v momentě, kdy se elektron nacházející ve vyšší vodivostní hladině setká s fotonem s energií rozdílnou oběma hladinám. Tento foton se nazývá stimulující. Stimulující foton způsobí, že se elektron vrátí zpátky na původní vodivostní hladinu v době kontaktu s fotonem. Při návratu vyzáří foton, jenž má stejnou energii, směr šíření a fázi jako stimulující foton. Průběh stimulované emise je znázorněn na následujícím obrázku [2].



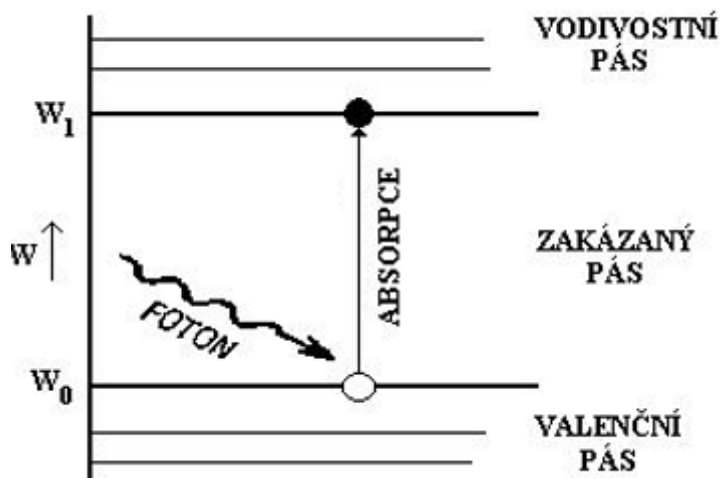
Obr. 1.3 Stimulovaná emise fotonu [2]

2 POLOVODIČOVÉ LASERY

Polovodičové lasery jsou v dnešní době jedny z nejrozšířenějších užívaných laserů. Hlavním zástupcem těchto laserů je laserová dioda (LD). U polovodičových laserů, na rozdíl od jiných, není způsoben přechod elektronů mezi energetickými hladinami, ale přechází mezi energetickými pásy. Dále se liší absencí buzení za pomoci vnějšího záření, ale buzení je způsobeno elektrickým proudem.

2.1 Generace laserového záření v polovodičovém laseru

Polovodičové lasery stejně jako ostatní lasery musí dodat za pomoci fotonu dostatečnou energii elektronu pro přesun energie z valenčního pásu do vodivostního přes zakázaný pás, což je vidět na obrázku 2.1. Hlavní výhoda polovodičů je, že mívají velikost zakázaného pásma v rozmezí 1 až 4 elektronvoltů, což je ideální velikost pro tvorbu infračerveného a viditelného světla. Všechny popisované děje probíhají u valenčních elektronů, jinak nazývaných optických. Pokud by se absorpce účastnily elektrony, nacházející se na nižší hladině, než jsou valenční elektrony, došlo by k emisi rentgenového nebo gama záření.



Obr. 2.1 Absorpce fotonu v polovodiči [2]

Aby nastal děj, který je zobrazen na obrázku 2.1, musí mít foton takovou energii, jako je rozdíl energie mezi vodivostní hladinou, na kterou se elektron přesune, a hladinou současnou. Je to definováno vztahem 2.1 [2].

$$hf_{01} = W_1 - W_0 \quad (2.1.)$$

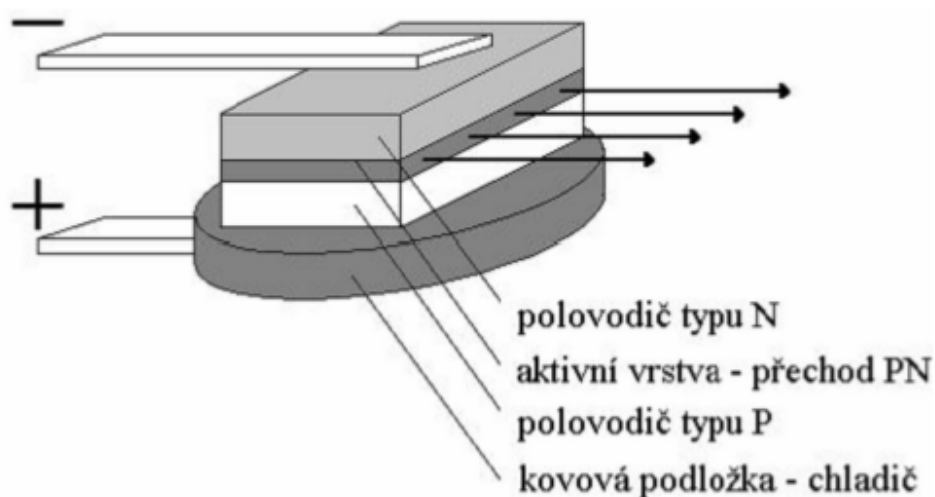
W vodivostní pás, h Planckova konstanta, f_{01} frekvence absorbovaného fotonu.

2.2 Typy a struktury laserových diod

LD mohou být rozděleny buď podle vnitřní struktury nebo dle konstrukce.

2.2.1 Homostrukturní lasery

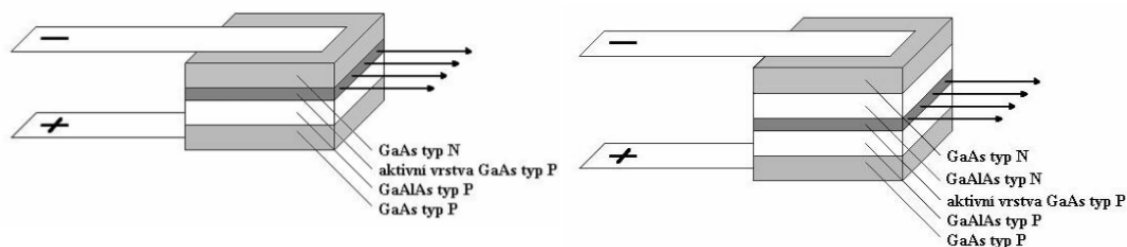
Byl vyroben již roku 1962 [3]. Jedná se o jeden z prvních polovodičových laserů. Aktivní vrstvu určuje délka difúze menšinových nosičů. Protože tyto struktury mají velké šířky aktivní oblasti, je potřeba velká prahová hustota proudu. Vlivem velkých ztrát záření ve struktuře má laser malou účinnost a je potřeba dostatek chlazení. Pro tyto nedostatky nemá laser příliš velké využití. Jeho struktura je znázorněna na následujícím obrázku.



Obr.2.2.1 Struktura homostrukturního laseru [3]

2.2.2 Heterostrukturní lasery

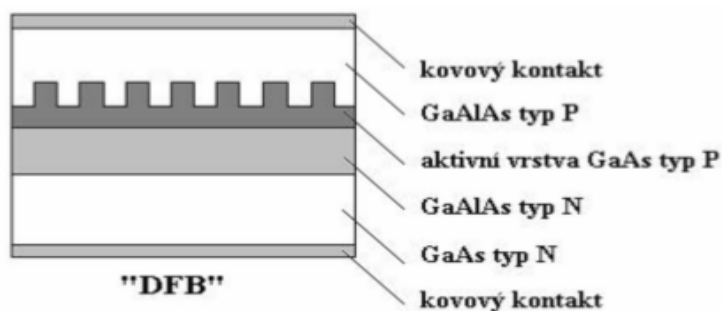
Tato struktura má oproti homostrukturním laserům minimálně jednu vrstvu navíc, ta se nazývá heteropřechod. Na rozdíl od zbytku polovodiče má větší rozdíl mezi vodivostním a valenčním pásem. To zajišťuje skokovou změnu indexu lomu a světlo zůstává v aktivní oblasti a neproniká do zbytku polovodiče. Dle počtu heteropřechodů je možné tyto struktury rozdělit na lasery s jednotnou heterostrukturou SHL a dvojitou heterostrukturou DHL.



Obr. 2.2.2 Struktura SHL (vlevo) a DHL (vpravo) [3]

2.2.3 Lasery s rozprostřenou zpětnou vazbou

U těchto laserů se nepoužívá zrcadlový rezonátor. Ten je realizován pomocí difrakční mřížky, která je vyleptána přímo do aktivní oblasti. Tato struktura je zachycena na obrázku 2.2.3.

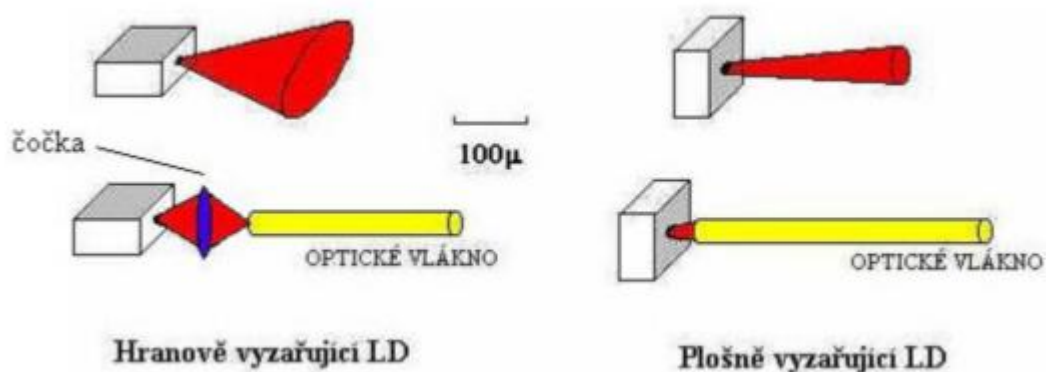


Obr. 2.2.3 Struktura laseru s rozprostřenou zpětnou vazbou [3]

2.2.4 Hranově a plošně vyzařující lasery

Hranově vyzařující lasery vyzařují světelný paprsek z hrany přechodu. Ve výrobě i praxi zatím převládají. Při navazování laserového paprsku z LD do vlákna je nutno použít optiku.

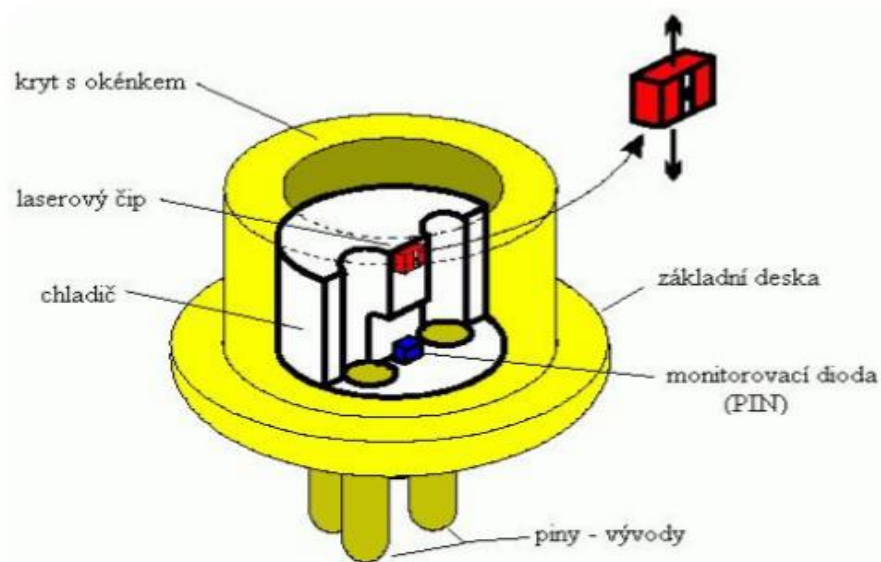
Plošně vyzařující lasery vyzařují paprsek z plochy LD, která je rovnoběžná s rovinou přechodu. Při navazování do vlákna není potřeba optických komponentů a laser má větší účinnost, než hranou vyzařující LD [3]. Oba dva typy vyzařování jsou vidět na obrázku 2.2.4.



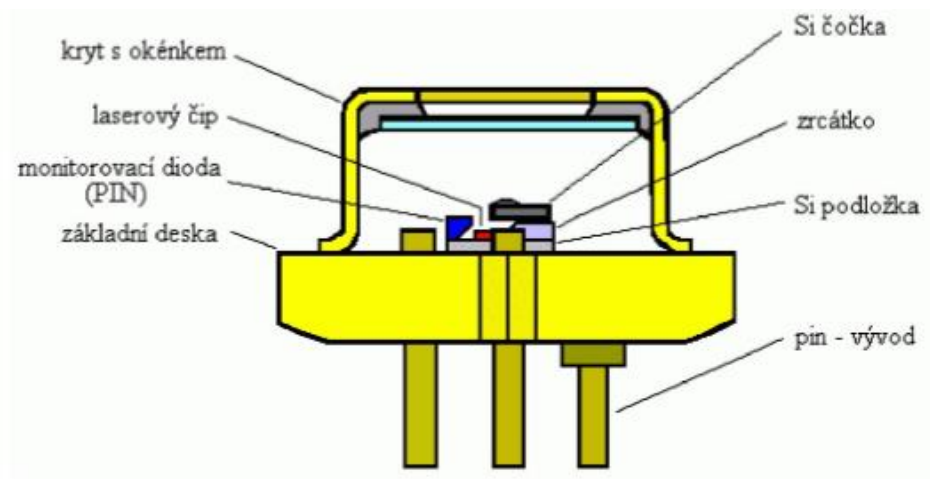
Obr. 2.2.4 Vyzařování hranovou a plošnou LD [3]

2.3 Pouzdření laserových diod

Pouzdro laserových diod se obvykle skládá z vlastního laserového čipu, monitorovací fotodiody (obvykle typu PIN), základní desky, pinů a krytu s okénkem. Rozmístění těchto součástí je znázorněno na obrázku 2.3.2. Fotodioda je zde využívána k měření vyzářeného záření z laserového čipu, což slouží ke zjišťování optického výkonu. Tato fotodioda má alespoň jeden vývod samostatný. Základní deska slouží k připevnění všech komponentů. U diod určených ke komunikaci je v pouzdře navíc odrazné zrcátko a čočka k zaměření vycházejícího záření. Což je znázorněno na obrázku 2.3.1.



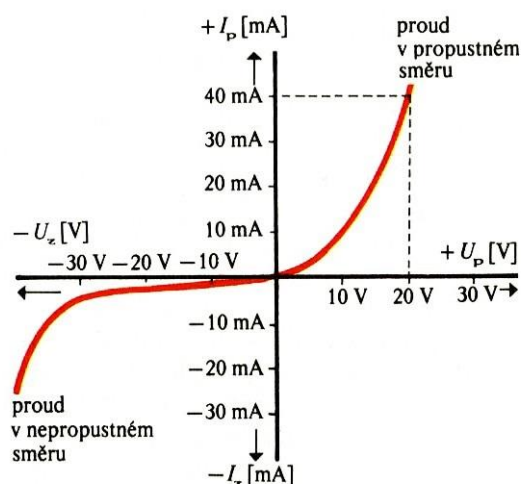
Obr. 2.3.1 Pouzdro laserové diody [3]



Obr. 2.3.2 Pouzdro laserové diody s čočkou [3]

2.4 Seznámení se s problematikou napájení LD a stabilizací výkonu

Protože se vyznačují LD malou dynamickou impedancí v lineární části své voltampérové charakteristiky, je třeba použít zdroj napájení s dostatečně velkým výstupním odporem [9]. To znamená, že musí být dodáván konstantní proud i při změně zátěže. Taktéž je potřeba nastavit pracovní bod LD a to tak, aby nebyly překročeny maximální parametry, které udává výrobce. Na obrázku 2.4. je zobrazena voltampérová charakteristika diody, ze které je patrné, že i malá změna napětí způsobí velkou změnu proudu. Z toho vyplývá, že z praktického hlediska je výhodnější řídit diodu za pomoci proudu neboli za pomoci proudového zdroje. Jedním z hlavních požadavků u LD je stabilní optický výkon, k tomu je nejčastěji využívána fotodioda, která kontroluje okamžitý optický výkon. Při zapojení fotodiody a použití jako zpětné vazby je možné ovlivnit napájecí proud a tím měnit optický výkon.



Obr. 2.4. Voltampérová charakteristika diody [9].

LD je třeba ochránit proti vznikajícím špičkám pronikajícím z napájecího zdroje, na které jsou laserové diody citlivé a mohly způsobit poškození. Před samotným zapojením LD je vhodné použít simulátor laseru a ujistit se, že nedojde k poškození LD. Simulátor laseru může být usměrňovací dioda, luminiscenční dioda či optron.

2.5 Řízení LD

Před návrhem zapojení je třeba rozhodnout, zda se bude laserový budič skládat z diskretních nebo integrovaných součástek. Diskretní zapojení má hlavní výhody v tom, že je možné v něm snadno udělat úpravy a snadněji se rozeznají funkce jednotlivých částí obvodu. Z těchto důvodů se takový postup používá například při návrhu prototypu, u kterého lze očekávat, že se zapojení bude měnit. Integrované řešení se naopak uplatní při sériové výrobě, protože toto řešení bývá stabilnější, menší a úspornější. Dále budou v této kapitole ukázána teoretická řešení pro obě možnosti.

2.5.1 Integrované řešení zapojení

V prvním kroku je nutné najít vhodný integrovaný obvod, který bude splňovat požadavky. Níže v práci jsou uvedeny některé integrované obvody od firmy iC-Haus, jenž se zabývá hlavně integrovanými obvody v optoelektronice.

IC-WK MSOP8

- výstupní proud do LD: 70 mA
- výstupní proud do kontrolní diody: 10 až 2500 μ A
- provozní teplota: -40 až 85 °C

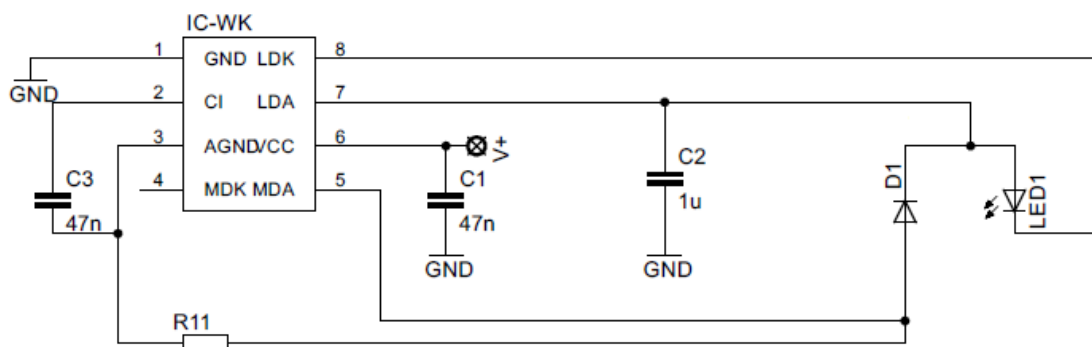
IC-HK MSOP8

- výstupní proud do LD: 150 mA
- výstupní proud do kontrolní diody: -
- provozní teplota: -25 až 85 °C

IC-WJ MSOP8

- výstupní proud do LD: 250 mA
- výstupní proud do kontrolní diody: 50 až 500 μ A
- provozní teplota: -25 až 90 °C

Pro návrh se vybral integrovaný obvod IC-WK, ten použije dostatečně velký proud do LD a navíc umožňuje její kontrolu za pomoci kontrolní foto diody. Níže je navrženo jeho zapojení z katalogového listu. D1 zastupuje fotodiodu a LED1 laserovou diodu.

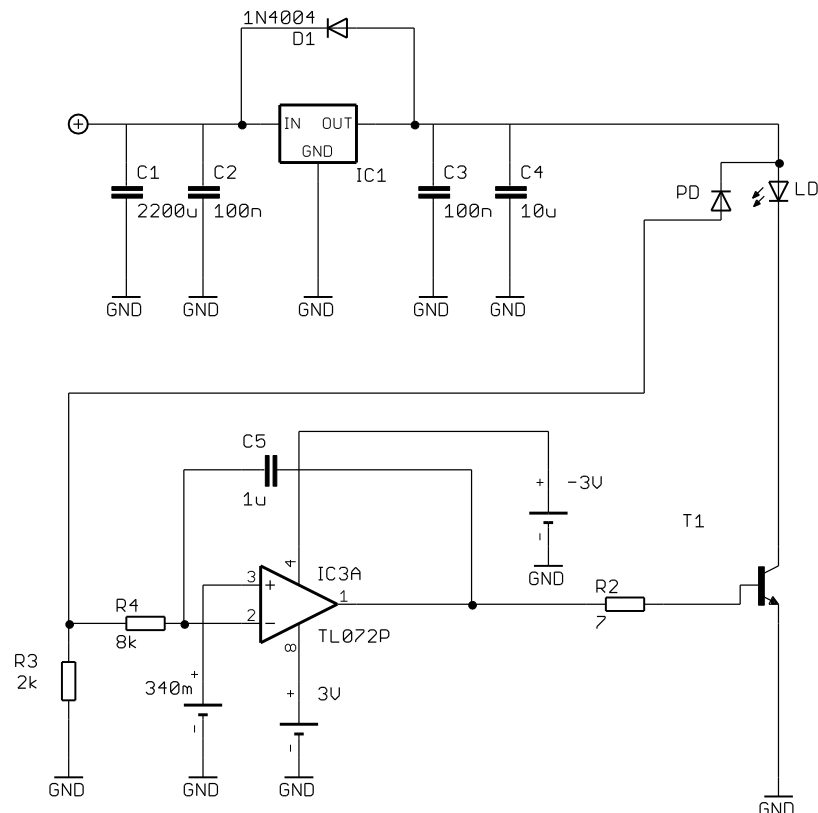


Obr. 2.5.1 Teoretické zapojení LD s IC-WK [15].

2.5.2 Diskrétní řešení zapojení

Zapojení použité v rámci bakalářské práce je na obrázku 2.5.2 v závěru této podkapitoly. Zapojení lze rozdělit na dva hlavní bloky. Prvním blokem je stabilizátor napětí, který zajistí, že na jeho výstupu bude stabilní napětí. Kondenzátor C1 vyhlazuje kladnou půlvlnu. C2 je blokovací kondenzátor, který se při rychlé změně proudu zátěží vybíjí. C3 je druhý blokovací kondenzátor a C4 slouží k jemné filtraci napětí. IC1 je stabilizátor s označením 7805, který stabilizuje napětí na 5 V. Dioda D1 je zde pro ochranu stabilizátoru, aby nedošlo k situaci, kdy na jeho výstupu bude větší napětí než na vstupu.

Druhým blokem je komparátor sloužící k porovnání napětí z fotodiody PD a referenčního napětí. Z proudu fotodiody, který by měl téci při požadovaném záření LD, a odporu R3 bylo nastaveno referenční napětí 340mV. A nakonec kondenzátor C5 je zde proto, aby nedošlo k rozkmitání obvodu z důvodů skokové změny z fotodiody.



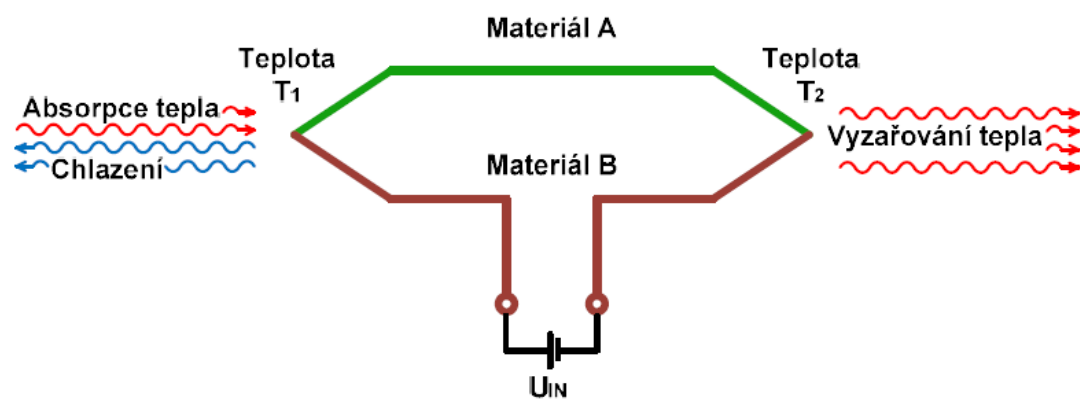
Obr. 2.5.2 Teoretické diskretní zapojení budiče LD

2.6 Problematika chlazení LD

Při práci s LD je třeba diodu dostatečně chladit. Pokud by se nezajistilo dostatečné chlazení, tak by se dioda začala zahřívat, čímž by vzrostl procházející proud, a to by mohlo vést až k tomu, že by se laserová dioda zničila. Je to zapříčiněno tím, že při zahřátí se zmenší optický výkon, to se snaží fotodioda napravit, že zvýší proud procházející LD, čímž ale víc zahřeje LD a situace se opakuje. Zahřívání LD kromě zvýšení procházejícího proudu mění prahový proud, vlnovou délku a více se uplatní spontánní emise, díky čemuž se zhorší vlastnosti laseru [9].

Chlazení jde rozdělit do dvou hlavních skupin – na pasivní a aktivní chlazení. U pasivního chlazení se používá přirozeného odvodu tepla, například pomocí chladicí destičky a vzduchu. Naopak u aktivního chlazení se zvyšuje odvod tepla za pomoci vnějšího zdroje, kterým může být větrák.

V elektronice se s oblibou využívají termoelektrické chladiče. U těchto chladičů lze pomocí směru proudu určit, zda se bude součástka ochlazovat nebo zahřívat. Jeden z termoelektrických chladičů se nazývá Peltierův článek, který pracuje na principu Peltierova jevu zachyceného na obrázku 2.6. Je vidět, že pokud jsou spojeny dva vhodné materiály ve dvou bodech a poté na ně přiloženo napětí, může jeden spoj sloužit k přijímání tepla a druhý k jeho vyzařování.

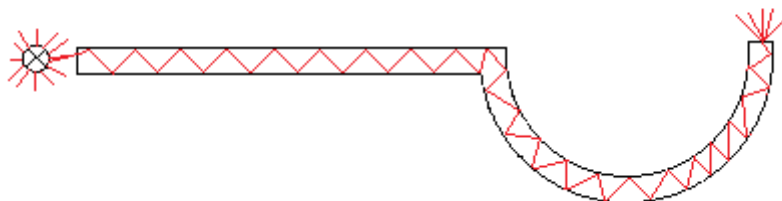


Obr. 2.6 Peltierův jev [10].

3 OPTICKÁ VLÁKNA

3.1 Princip optických vláken

Jelikož se zemská atmosféra nehodí na přenášení světelného paprsku na velkou vzdálenost, muselo se proto najít vhodnější přenosové médium. Bylo vyzkoušeno mnoho druhů vedení, jako například vyčerpané trubky, čočkový světlovod a optické vlákno [4]. Nakonec se ukázalo, že nejlepší přenosové médium je optický kabel, který využívá jev úplného odrazu. Jeho velkou výhodou je, že se v něm paprsek šíří, i když je vlákno ohnuto. Tento jev je viditelný na obrázku níže.



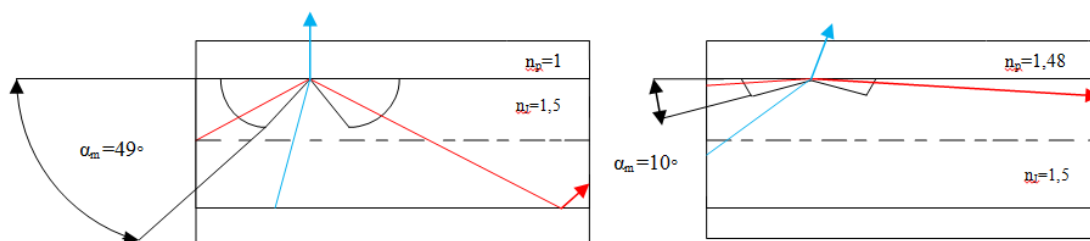
Obr. 3.1 Šíření světla v optickém vláknu [4]

Úplný odraz znamená, že pokud paprsek narazí do rozhraní mezi dvěma prostředími s různými indexy lomu, odrazí se celý pod stejným úhlem jako při nárazu. U optického vlákna se nejčastěji toto rozhraní vytvoří ze skleněného jádra a skleněného pláště, které mají vlastní index lomu. Na plášť může být nanášena ochranná vrstva za účelem zpevnění samotného vlákna.

Aby se paprsek v optickém vláknu úplně odrazil, je nutné zajistit, že světelný svazek dopadne na rozhraní pod menším úhlem, než je mezní úhel, které je dán vztahem:

$$\cos \alpha_m = \frac{n_p}{n_j} \quad [4] \quad (3.1)$$

α_m mezní úhel, n_p index lomu pláště, n_j index lomu jádra



Obr. 3.2 Vystupující (modře) a úplně odražené (červeně) paprsky ve světlovodu [4]

Z obrázku 3.2 je patrné, že čím je rozdíl indexu lomu větší, tím větší je mezní úhel.

Díky tomu může paprsek dopadat na rozhraní jádro-plášť ve více možných úhlech. Z toho by se dalo usoudit, že by měly být zvoleny materiály s co možná největším rozdílem indexu lomu, to je však možné pouze v případě, kdy nejsou požadavky na přenosovou kapacitu [4].

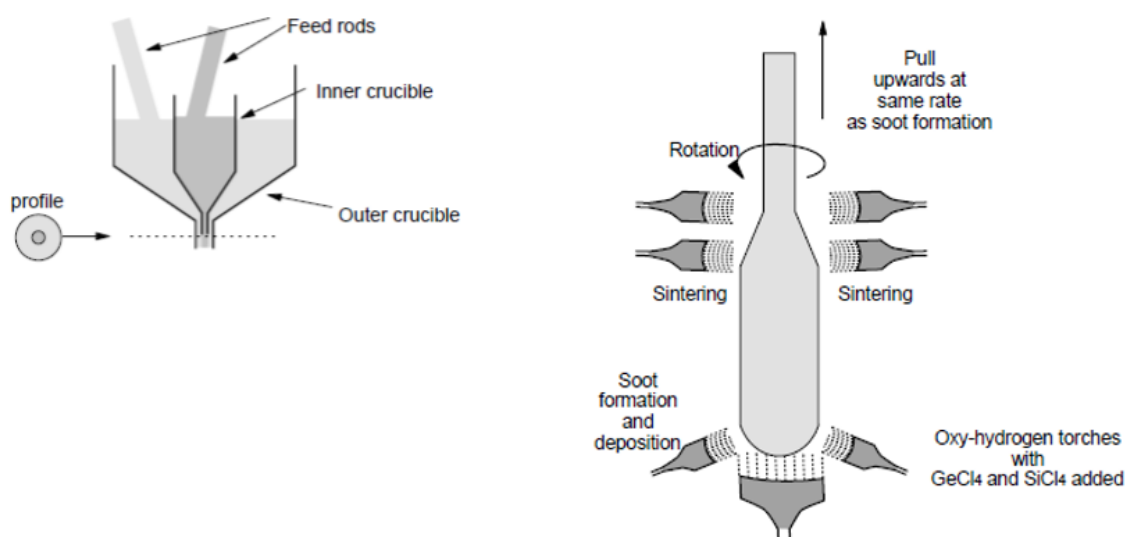
3.2 Výroba optických vláken

Optická vlákna se vyrábějí buď ze skla s příměsí křemíku nebo přímo z křemičitého skla. Jeden z požadavků na optické kabely je, že ztráty v nich musí být nižší než 30 dB/km. To zajišťuje, že je potřebné do obvodu přidat zesilovač minimálně po jednom kilometru. K dosažení ztráty 30 dB/km musí mít optický kabel měřitelnou hodnotu nečistot na úrovni 10^{-8} až 10^{-9} [4].

Na výrobu optického kabelu se využívá mnoho různých druhů metod. Velká část z nich má však společný princip, který vychází z takzvané preformy. Preforma je vyrobena ze skla, které se při intenzivním ohřevu táhne do vlákna.

Jedna z prvních a nejjednodušších metod na výrobu vlákna byla metoda “trubka a tyčka“. U ní se do trubky ze skla s malým indexem lomu vloží tyčka z velmi čistého tavného křemene. Ačkoliv je metoda velmi jednoduchá a produktivní, tak se neuchytila, protože mezi trubkou a tyčkou vznikaly rýhy, nerovnosti a nečistoty. Ty měly za následek zvětšení útlumu ve vláknech.

Další metodou je metoda dvojitého kelímku, která nevyužívá preformu. Uvnitř dvojitého kelímku se odděleně taví materiál jádra a pláště a tažením se vytváří jedno vlákno. Žádaný průběh indexu lomu se dosahuje difúzí jádra a pláště na jejich kontaktu a vhodnou volbou složení pláště a jádra. Hlavním nedostatkem této metody je samotný kelímek, který může do taveniny vnášet nečistoty. Je možné nedostatky této metody odstranit za pomoci metody CVD, při které se do křemičité trubky s vysokou hodnotou čistoty vpouští plyn. Při dané teplotě se plyn vysráží do tenkých vrstev, které jsou následně základem pláště a jádra vlákna. K vytvoření jádra bývá zapotřebí 100 vrstev a na plášť je potřeba 20 vrstev [4]. Zdokonalením metody CVD je metoda VAD, která vysráží plynný materiál na čelo tyčky. Za pomoci nastavení vzdálenosti, tvaru a sklonu trysek, které plyn nanáší, lze nastavit žádaný index lomu. Na obrázku 3.3 je možno vidět metody dvojitého kelímku a VAD.



Obr. 3.3 Metoda dvojitého kelímku (vlevo) VAD metoda (vpravo) [5]

3.3 Ztráty v optických vláknech

Ztráty v optickém vlákně lze rozdělit do dvou hlavních skupin, buď na ztráty rozptylem nebo ztráty absorpcí.

Absorpční ztráty – jsou ztráty, kdy je energie paprsku pohlcena uvnitř vlákna. Dokonale čisté sklo na vlnových délkách 0,8 - 1,6 μm nemá téměř žádný útlum. Bohužel není možno dokonale čisté sklo vyrobit, pokaždé bude obsahovat určité množství nečistot. V tabulce 3.1 jsou uvedeny příměsi částic, které mohou ve vlákně pohlcovat fotony procházejícího světla. V tabulce je také uvedeno, jaký musí být váhový podíl, aby útlum nepřekročil 1 dB/km

Tab. 3.1: Nečistoty v optickém vlákně [6]

| Ionty | Váhový podíl pro útlum 1 dB/km |
|------------------|-----------------------------------|
| Cu^{2+} | $2,5 \cdot 10^{-9}$ |
| Fe^{2+} | $1 \cdot 10^{-9}$ |
| Cr^{3+} | $1 \cdot 10^{-9}$ |
| OH^- | $1,25 \cdot 10^{-6}$ |

Ztráty rozptylem – jedná se o ztráty, kdy se část paprsku dostane ven z vlákna. To může nastat, když index lomu není v celém materiálu homogenní. Dále mohou být ztráty zaviněny drsností rozhraní jádro-plášť. Rozptyl je také způsoben ohybem vlákna. Tento ohyb může vzniknout při manipulaci, při navíjení na bubnu či vlivem nerovnosti bubnu.

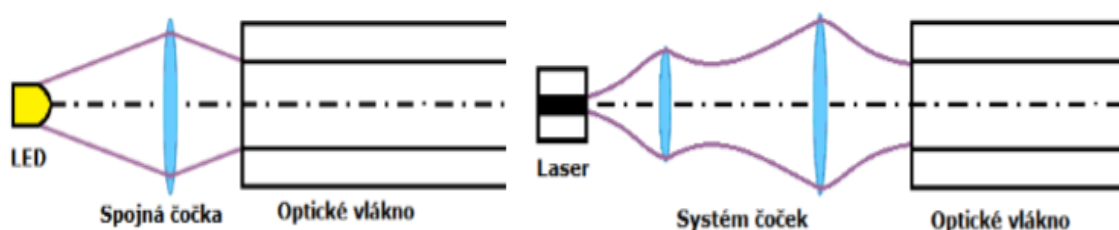
V dnešní době, ačkoliv zatím jen v laboratorních podmínkách, se povedlo celkové ztráty, jak absorpční, tak i rozptylem, snížit až na 1 dB/Km. V praxi se však využívají vlákna s celkovým rozptylem mezi 5 – 10 dB/km [4].

4 PROBLEMATIKA VAZBY LASER-OPTICKÉ VLÁKNO

Jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, do optického vlákna musí světelný paprsek vstupovat pod určitým úhlem, aby nebyl signál utlumován. Taktéž je zapotřebí dostat do vlákna co možná největší množství energie, díky které se může paprsek šířit na větší vzdálenosti. Jelikož lasery a LD nevyzařují laserový paprsek do jednoho bodu, je potřeba paprsek usměrnit. K tomu je možno využít jednu z těchto metod:

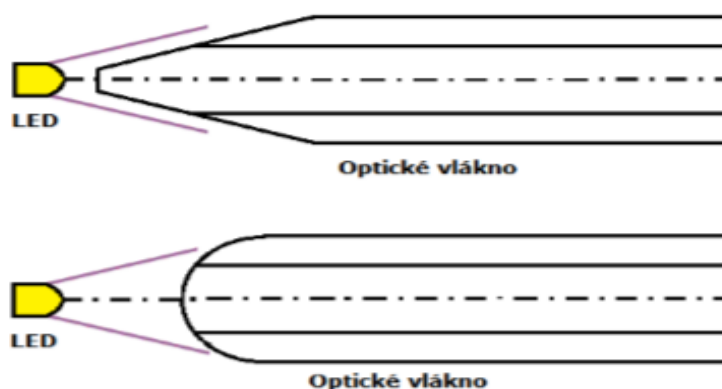
Vlákno v těsné blízkosti přechodu laseru – což je nejjednodušší metoda, jak propojit laser a optické vlákno. Jak je z názvu patrné, vlákno se přiloží co možná nejbližší ke zdroji paprsku. Tento způsob nám zajišťuje účinnost přibližně 10 % [7]. Nízká účinnost je z toho důvodu, že se metoda nezaměřuje na úhel, pod jakým vstupuje paprsek do vlákna.

Použití čočky – mezi laser a optické vlákno se vloží spojná čočka, která umožní, že se paprsek z laseru dostane do cíleného bodu pod potřebným úhlem. V tomto případě již může čočka být součástí vlákna či diody. Metoda za použití čočky může být vylepšena, pokud se namísto jedné čočky použije systém čoček. Což může zajistit účinnost až 40 % [7].



Obr. 4.1 Použití spojné čočky (vlevo) a systému čoček (vpravo) [7]

Tvarování konců vlákna – metoda zachycená na obrázku 4.2, kde jsou viditelné dva způsoby úpravy konců vlákna tak, aby byla zajištěna větší účinnost, která může dosahovat 65 % [7].

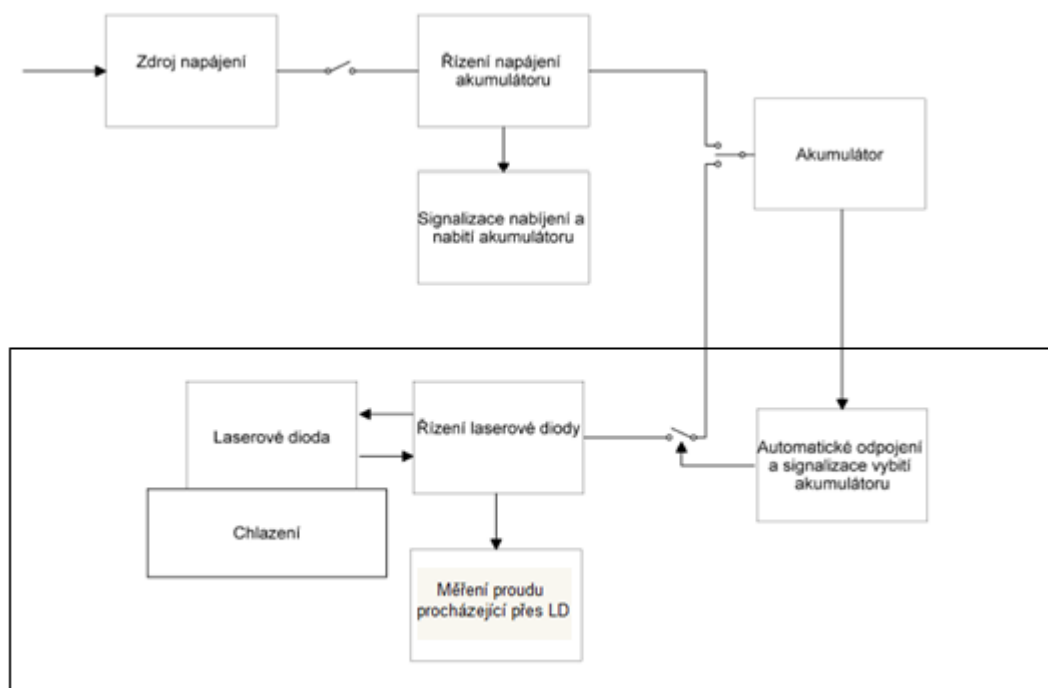


Obr. 4.2 Tvarované konce vláken [7]

5 NÁVRH PŘÍPRAVKU LASEROVÉHO ZDROJE A JEHO NAPÁJENÍ

5.1 Blokové schéma

Na obrázku 5.1 je zakresleno blokové schéma předpokládaného přípravku. Pro ochranu LD se bude laserová dioda napájet z akumulátoru. Ten se bude pomocí mechanického spínače přepínat mezi obvodem pro řízení napájení a řízení laserové diody. Obvod pro řízení napájení bude napájen skrz adaptér. Z řízení napájení povede obvod k detekci nabití akumulátoru. Mezi akumulátorem a řízením laserové diody je přiveden obvod pro automatické odpojení akumulátoru sloužící k ochraně akumulátoru před přílišným vybitím a k signalizaci přepojení akumulátoru k nabíječce. Laserová dioda bude připevněna k vhodnému chladiči a připojena k řízení laserové diody. Dále v této kapitole budou rozebrány podrobněji jednotlivé bloky.



Obr. 5.1 Blokové schéma přípravku

5.2 Zdroj napájení

K napájení celkového obvodu byl vybrán adaptér 15 V 800 mA MEAN WELL, který nám převede síťové napětí na stejnosměrné s 15 V úrovní, jenž je vhodné pro napájení akumulátoru. Jeho další výhodou je snadné odpojení díky výstupnímu konektoru adaptéru.

5.3 Řízení napájení akumulátoru a signalizace nabíjení a nabití akumulátoru

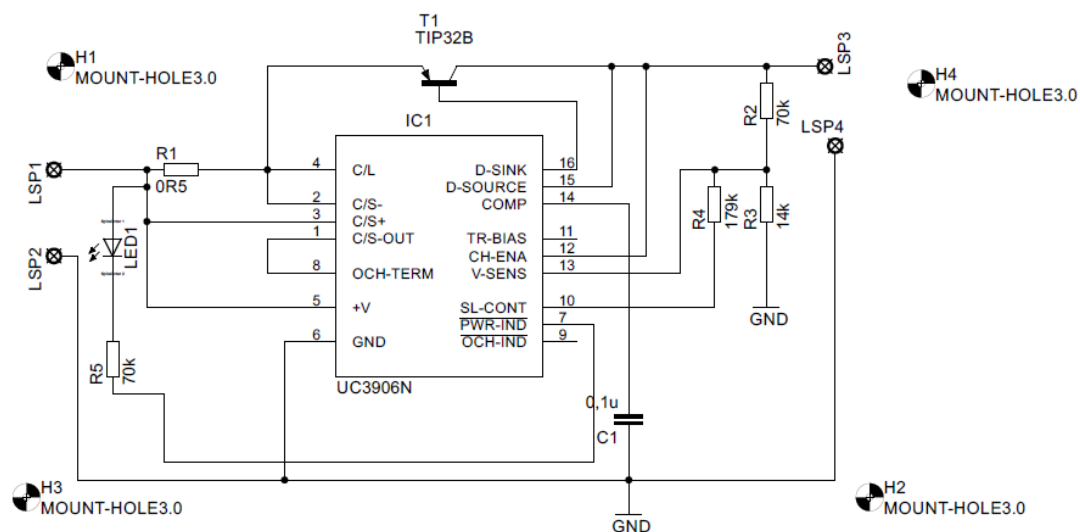
Na obrázku 5.3.1 je obvodové schéma pro řízení napájení akumulátoru. V něm je použit integrovaný obvod UC3906. Tento obvod od firmy TEXAS INSTRUMENTS je určen speciálně pro napájení olověných akumulátorů. Jeho hlavní předností je univerzální využití pro jakýkoliv typ olověných akumulátorů. Na obrázku 5.3.1 je celkové zapojení pro řízení nabíjení. Toto zapojení bylo navrženo za pomoci katalogového listu UC3906 a akumulátoru. Ze vzorců uvedených níže byly spočítány odpory R1, R3, R4. Hodnota R2 byla zvolena k možnému dopočítání součástek. Zbývající součástky byly zadány výrobcem UC3906. Led1 a R5 slouží k detekci nabíjecího napětí. Při použití níže vypočtených součástek se změřená hodnota nabíjecího proudu tekoucím do akumulátoru rovná 109 mA.

$$R_1 = \frac{0,025}{I_1} = \frac{0,025}{0,046} \cong 0,5\Omega[11].$$

$$R_3 = \frac{R_2}{\frac{V_f}{V_{ref}} - 1} = \frac{70 * 10^3}{\frac{13,7}{2,3} - 1} \cong 14,3 * 10^3 \Omega[11]$$

$$R_4 = \frac{R_2}{\frac{V_v}{V_{ref}} - \frac{R_2}{R_3} - 1} = \frac{70 * 10^3}{\frac{14,6}{2,3} - \frac{70 * 10^3}{14 * 10^3} - 1} \cong 179,3 * 10^3 \Omega[11]$$

I_1 je rovna 1/50 kapacity akumulátoru, V_f Nabíjecí napětí, V_{ref} referenční napětí UC3906, V_v vyrovnávací napětí



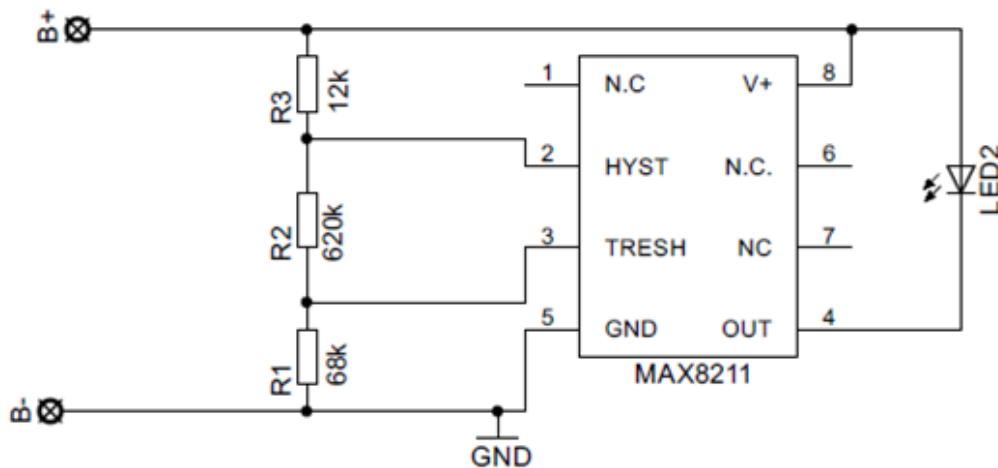
Obr. 5.3.1 Zapojení UC3906N

Pro detekci nabití akumulátoru byl použit obvod Max8211, jeho zapojení je na obrázku 5.3.2. Pomocí odporů R1, R2 a R3 nastaven tak, aby při poklesu napětí akumulátoru na 11,8 V rozsvítil LED diodu a při nabití nad 11,9 V dioda zhasla. Odpor R1 byl zvolen a R2 s R3 dopočítán z vzorců níže. Podrobnější popis a funkce obvodu MAX8211 jsou uvedeny v kapitole 5.5.

$$R2 = R1 * \frac{V_L - 1,15}{1,15} = 68 * 10^3 * \frac{11,8 - 1,15}{1,15} \cong 620 * 10^3 \Omega [14].$$

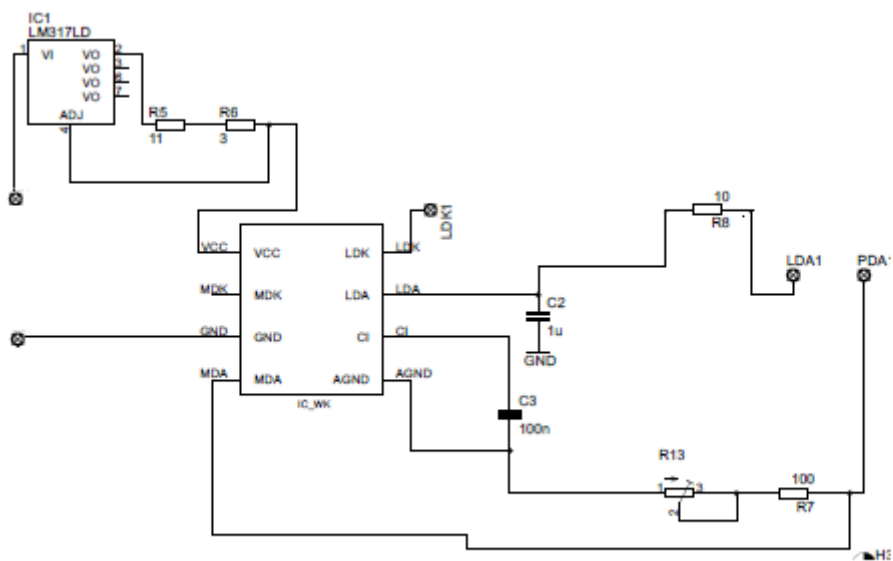
$$R3 = R1 * \frac{V_U - V_L}{1,15} = 68 * 10^3 * \frac{11,9 - 11,8}{1,15} \cong 12 * 10^3 \Omega [14].$$

V_L hodnota napětí při odpojení LD, V_U hodnota napětí při opětovném připojení LD



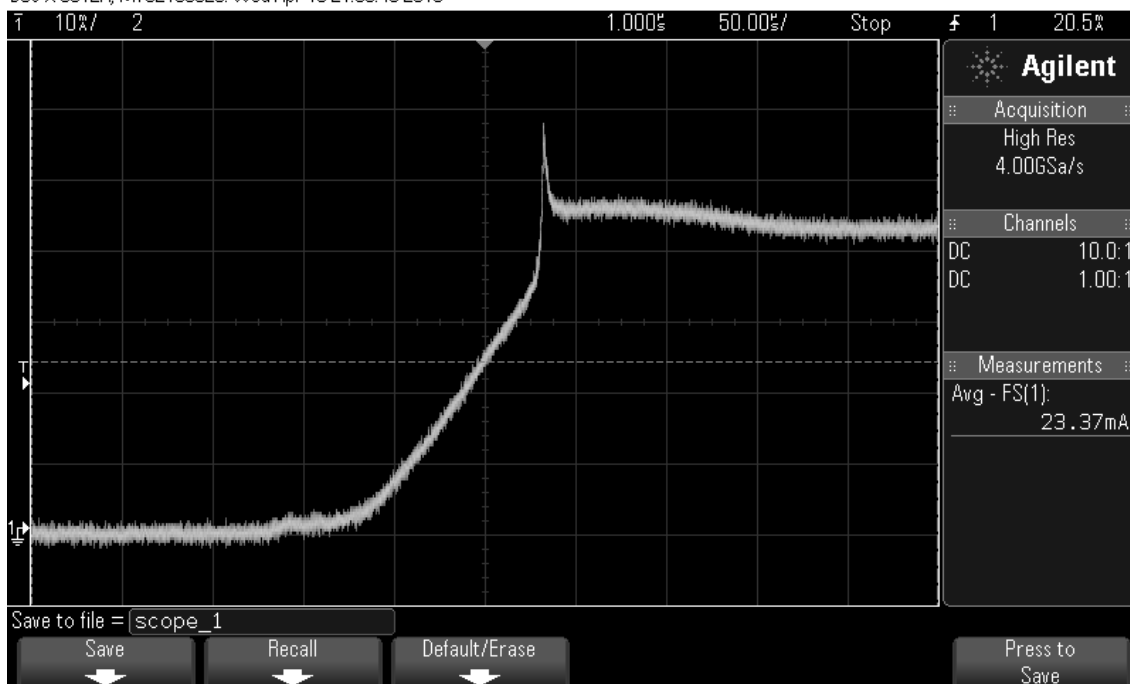
Obr. 5.3.2 Zapojení MAX8211 pro signalizace nabití akumulátoru

když se tento obvod odstraní, zmizí špička a i nárůst proudu je mnohem strmější. Z těchto důvodů byl obvod LM317 umístěn před IC-WK kde nemůže ovlivňovat průběh proudu na LD. Upravené zapojení je vidět na obrázku 5.6.2.

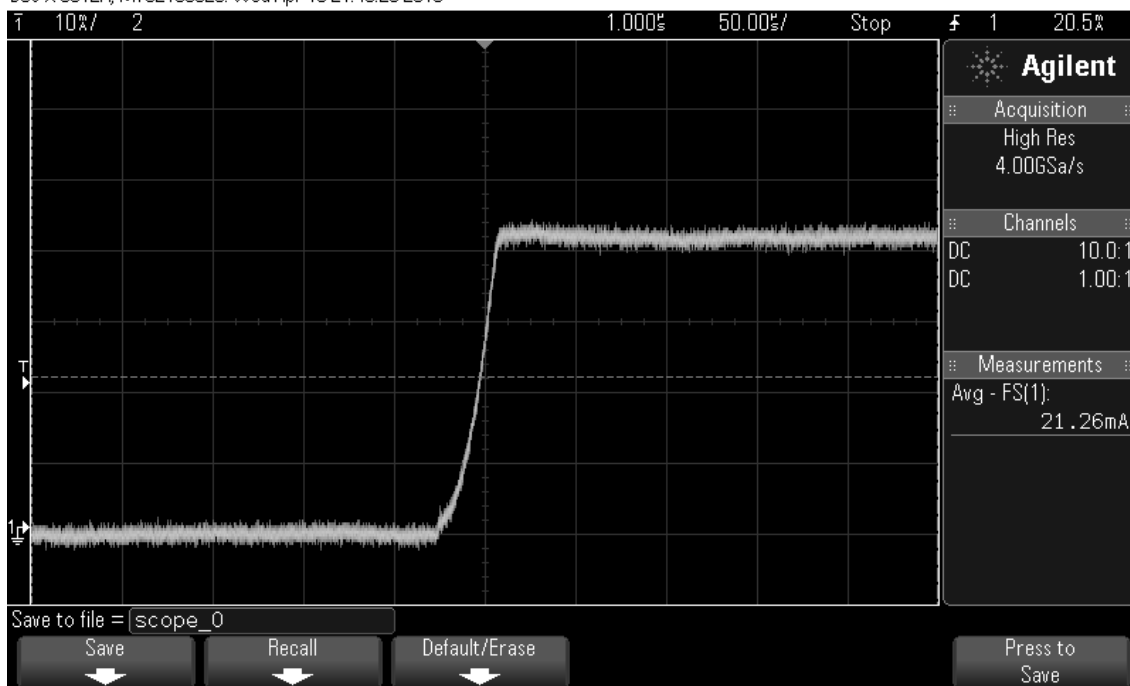


Obr. 5.6.2 Obvodové zapojení integrovaného napěťového budiče LD 2

DSO-X 3012A, MY52160820: Wed Apr 18 21:50:46 2018



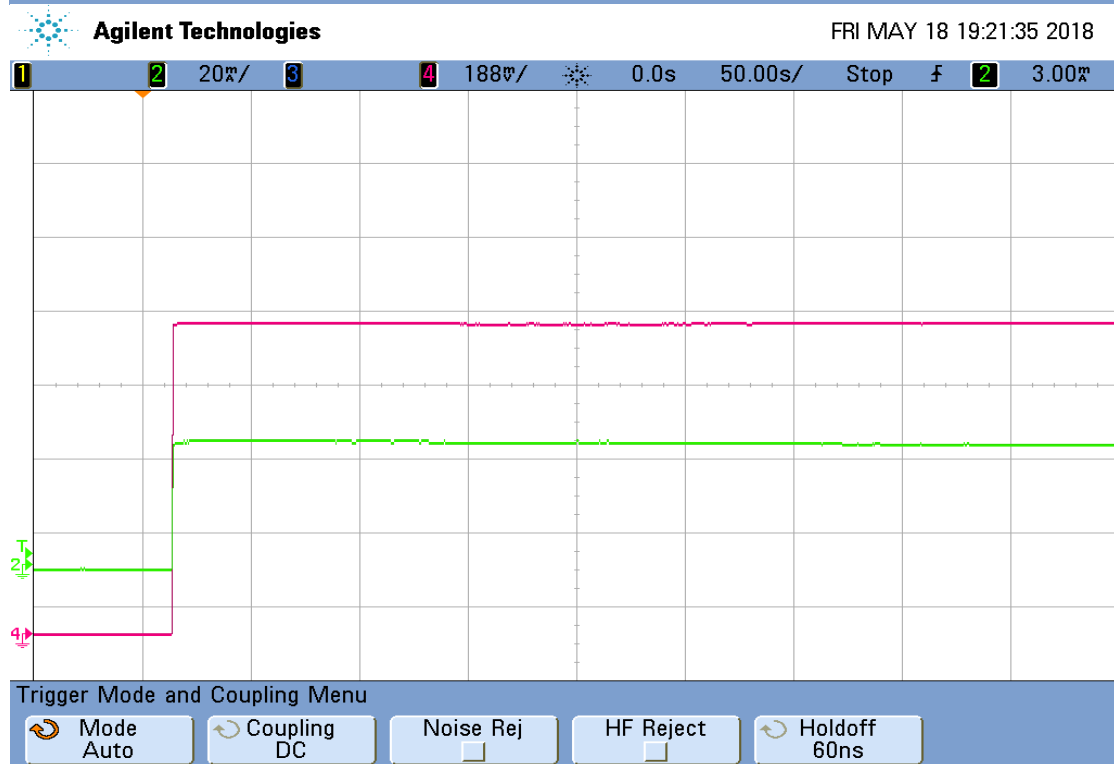
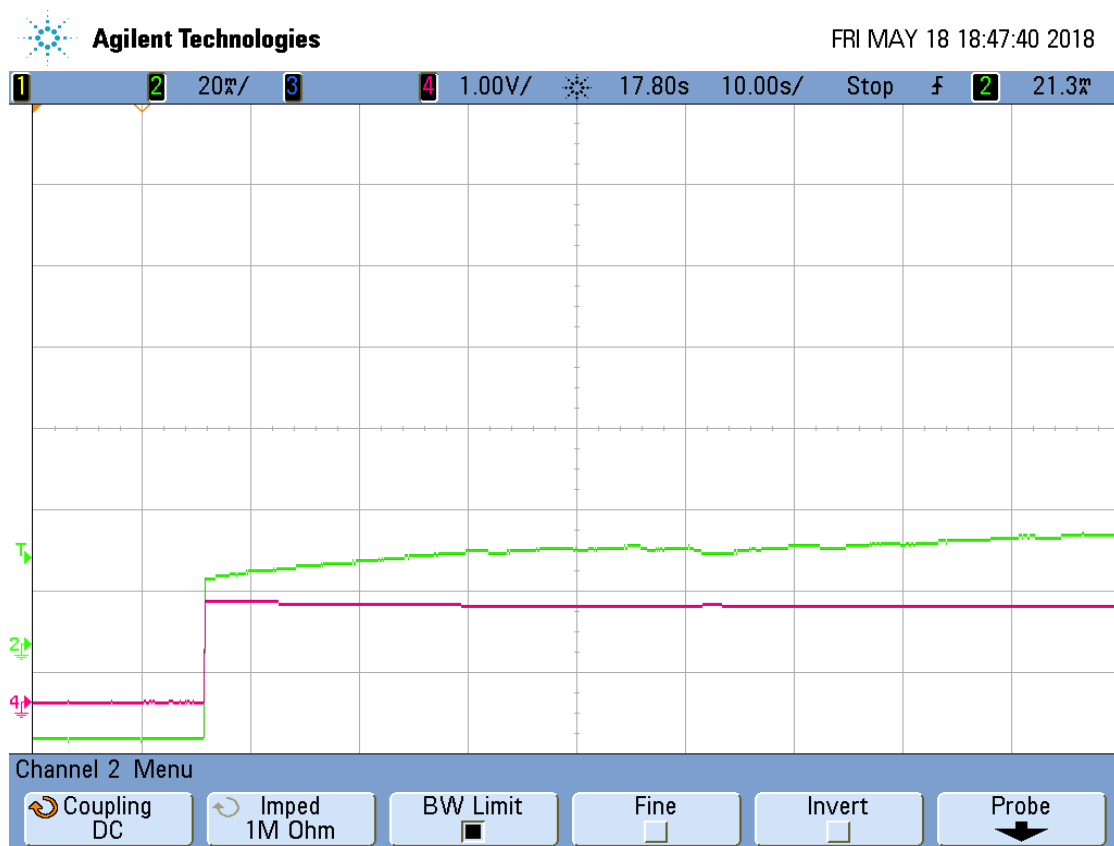
DSO-X 3012A, MY52160820: Wed Apr 18 21:49:28 2018



Obr. 5.6.3 Průběhy proudu na LD

Po odstranění výše uvedených problémů byla pomocí zkušební LD ADL-63153TL změřena stabilita optického výkonu za pomoci fotodetektoru typu PDA10CS-EC. Na průbězích v obrázku 5.6.4 jsou průběhy proudu (zeleně) a optického výkonu (růžově) s chladičem a bez něj. První snímek zobrazuje situaci bez chladiče. Je na něm vidět, že i při nárůstu proudu způsobeném zahřátím LD, se optický výkon téměř nemění. Tým se ověřilo že obvod IC-WK za pomoci fotodiody na laserové diodě udržuje stabilní

optický výkon. Druhý snímek ukazuje stabilitu proudu i výkonu po velice dlouhou dobu za použití kovového chladiče do tvaru L o rozměrech 20x10 cm. V tabulce 5.6 jsou uvedeny hodnoty napětí se ziskem 60 DB změřené pomocí fotodetektoru PDA10CS-EC a voltmetru a jejich přepočet na optický výkon. Proud LD byl 41 mA.



Obr. 5.6.4 Průběhy proudu a optického výkonu na LD

Tab. 5.6: Optický výkon LD s procentuální fluktuací výkonu

| | U_{60dB} [V] | P [μW] | P [%] |
|-----------|----------------|-----------------|---------|
| Minimální | 1,84 | 75,44 | 0,05 |
| Průměrná | 1,841 | 75,48 | 0 |
| Maximální | 1,8415 | 75,5 | 0,03 |

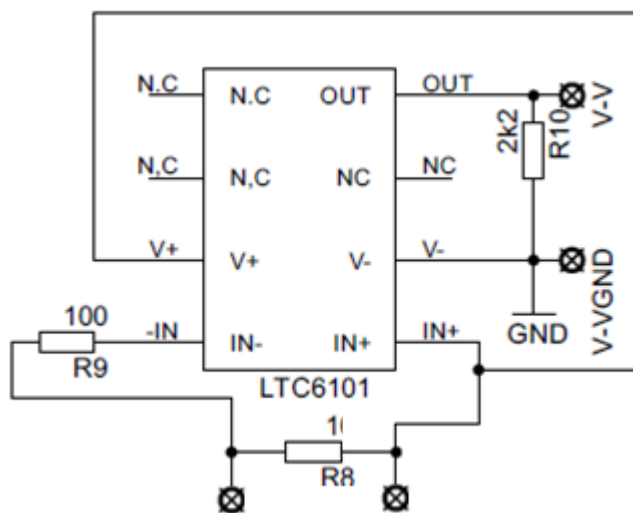
5.7 Měření proudu procházející přes LD

Aby bylo možné měřit proud tekoucí přes LD, byl použit integrovaný obvod LTC6101. Tento obvod snímá napětí z odporu R8, zesiluje ho a přenáší na digitální voltmetr WPB5035-DV. Zesílení napětí na výstupu se vypočítá pomocí vzorce:

$$Z = \frac{R_{10}}{R_9} = \frac{2200}{100} = 22[17].$$

Z zesílení i LTC6101

Zesílení bylo zvoleno tak, aby při maximálním proudu LD bylo možné zobrazit napětí na digitálním voltmetru značky WPB5035-DV 199,9mV.

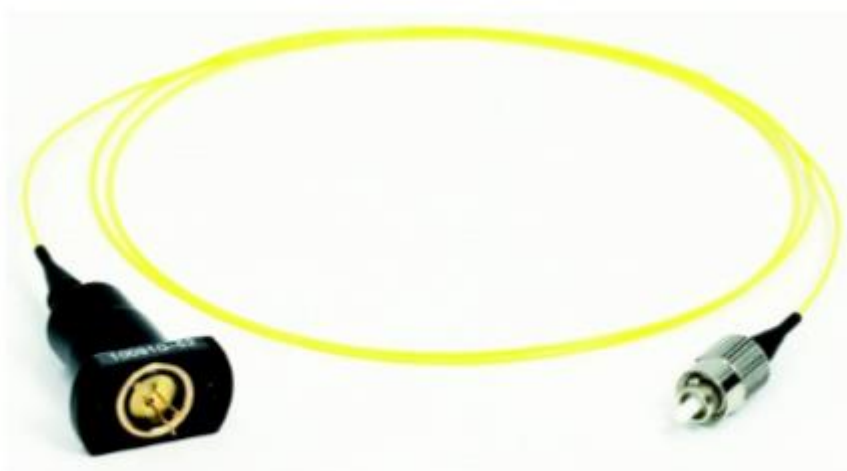


Obr. 5.7 Zapojení LTC6101

5.8 Laserová dioda a chlazení

Jak bylo řečeno v kapitole o LD a optických vláknech, je jejich vzájemné propojení velmi náročné. K tomu je zapotřebí přesných přístrojů a perfektně čisté prostředí,

jelikož i zrnko prachu, které by se dostalo mezi LD a optické vlákno, může způsobit rozptyl světelného paprsku. V návaznosti na tyto důvody bude použita laserová dioda typu fiber-pigtail, která je znázorněna na obrázku 5.8.1. Tato dioda už ve svém pouzdře má integrováno jednovidové optické vlákno. Vlákna je vůči LD osazena tak, aby bylo dosaženo co nejvyšší účinnosti přenosu laserového paprsku do vlákna.



Obr. 5.8.1 Fiber-pigtail LD [8]

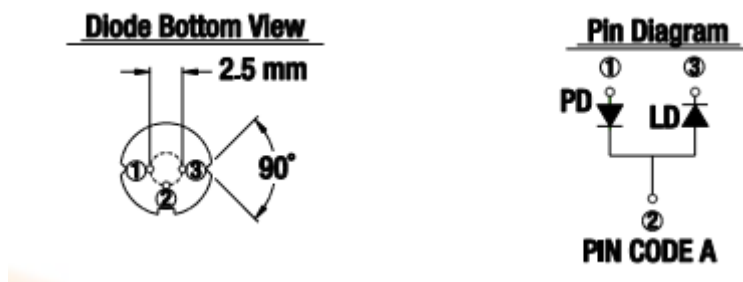
V této práci byla vybrána fiber-pigtail dioda s výrobním označením LPS-635-FCy. Ta vyzařuje na vlnové délce 635 nm a obsahuje optické vlákno o délce 1 m. Laserová dioda je typu HL6320G a optické vlákno SM600. V pouzdře je zabudována fotodiody sloužící ke kontrole optického výkonu. Následující tabulka obsahuje základní parametry diody při teplotě 25°C.

Tab. 5.8: Základní parametry LPS-635-FC [8]

| Veličina | Minimum | Optimum | Maximum | Jednotka |
|---------------------------------|---------|---------|---------|----------|
| Závěrné napětí laser. diody | --- | --- | 2 | V |
| Závěrné napětí fotodiody | --- | --- | 30 | V |
| Výkon výstupního paprsku | --- | 2,5 | 3,5 | mW |
| Provozní teplota | 0 | --- | 50 | °C |
| Skladovací teplota | -10 | --- | 65 | °C |
| Vlnové délky výstupního paprsku | 625 | 635 | 640 | nm |
| Prahový proud | 20 | 50 | 75 | mA |
| Napájecí proud | --- | 70 | 95 | mA |
| Napájecí napětí | --- | 2,2 | 2,7 | V |
| Monitorovací proud | 0,05 | 0,17 | 0,3 | mA |

LPS-635-FC má v sobě instalovanou fotodiodu, a aby ji bylo možné použít, má místo dvou vývodů jako klasická dioda tyto vývody tři. Jeden společný pro připojení kladné polarity napájení, druhý pro výstup fotodiody a třetí pro výstup LD. Jejich

rozmístění a vnitřní zapojení je vyznačeno na obrázku níže.



Obr. 5.8.2 Piny na LPS-635-FC [8]

Jak je vidět na výpočtu níže je maximální hodnota výkonu na LD 0,209 W. Z důvodů malého výkonu na LD, není nutné použít aktivní chlazení a bude stačit pasivní chlazení v podobě kovové destičky ohnuté do tvaru písmene L. To bylo ověřeno v kapitole 5.6, kde po použití tohoto chladiče přestal narůstat proud LD způsobený zahřátím LD.

$$P_{LD\max} = U_{LD\max} * I_{LD\max} = 2,2 * 0,095 = 0,209W$$

6 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce na začátku popisuje funkci a problematiku laserových diod a jejich možné propojení s optickými vlákny. Za pomoci těchto teoretických poznatků byl navržen bezpečný způsob napájení LD za pomoci akumulátoru. Dále bylo rozhodnuto to, že pro realizaci zapojení bude použita laserová dioda s označením LPS-635-FCy. Jeden z hlavních důvodů pro výběr této LD bylo, že je již propojená s optickým vláknem. Po vybrání LD se z jejích parametrů udávaných v katalogovém listu mohlo navrhnout vhodné zapojení.

Pro porovnání byly navrženy dvě schémata, jedno z diskrétních součástek a druhé z integrovaných. Ze schémat je vidět, že u integrovaného obvodu je k zapojení potřeba méně součástek a dá se jednodušeji ovládat. Z těchto důvodů bylo toto řešení vybráno k realizaci.

Následně bylo zapojení dostatečně modifikováno pro splnění základních požadavků a pro následnou výrobu na desku plošného spoje. Po jejím osazení se za pomoci zkušební LD ověřilo, že navržené zapojení laserového budiče je schopno udržet stabilní laserový výkon. Ten se drží stabilně na průměrné hodnotě $75,48 \mu\text{W}$ s fluktuací mezi $75,44 \mu\text{W}$ a $75,5 \mu\text{W}$. Tento výkon je jen část výkonu z LD který dopadá na fotodetektor přes malý otvor v krycí cloně a slouží k ověření stability optického výkonu. Tyto změny jsou v rozmezí 0,06 % průměrného výkonu a obvod lze označit za stabilní. Po ověření funkce laserového budiče byl připojen laserový budič skrz přepínač k akumulátoru a k napájecímu obvodu akumulátoru. Po propojení jednotlivých bloků se ověřila celková funkce přípravku.

Z důvodů problémů vzniklých při návrhu laserového budiče a špatného odhadu času k jejich vyřešení nebylo dokončeno finální zařízení, nepodařilo se LD s deskami obvodu do vhodného pouzdra a dodělat tak celek jako vhodný laboratorní přípravek. Dále u části pro automatické odpojení akumulátoru by bylo vhodnější využít jiné řešení z důvodu vysoké ztráty výkonu (přibližně 150 mW), jenž je způsoben neúplným otevřením transistoru. Možným řešením by mohlo být použití relé nebo použití jiného obvodu než MAX8211.

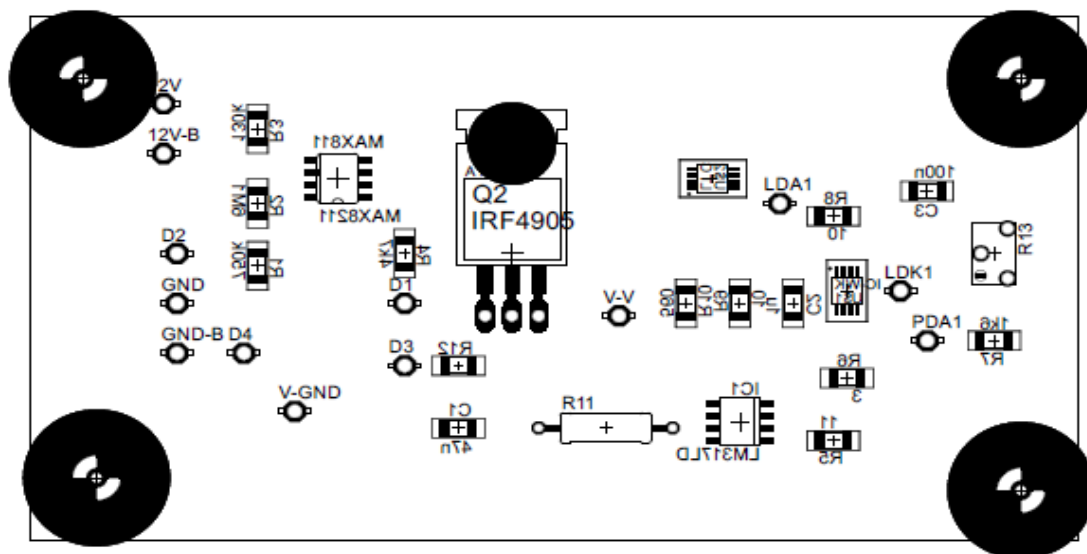
LITERATURA

- [1] KACHTÍK, L. *Princip laseru. Laser: a vše o něm.* [online]. Dostupné z: lasery.wz.cz[cit.2016-10-14]
- [2] Laserové diody.Elektrorevue[online].Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>[cit.2016-10-22]
- [3] Laserové diody.Elektrorevue[online].Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01043/index.html>[cit.2016-10-22]
- [4] Glaser, W. *Úvod do techniky světlovodu*, Praha : SNTL, 1984. 166 s.
- [5] Hudcová, L. *Základy optické komunikace optoelektroniky: přednášky*. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
- [6] Kubíček, Z. *Optické vláknové spoje*, Praha : 1981. 260s.
- [7] Pudil, K. *Navazování optických vláken*. Olomouc: Univerzita Palckého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Katedra optiky, 2011. Bakalářská práce. Doc. RNDr. Richard Horák, CSc
- [8] Napájecí adaptér síťový 15V 800mA 5,5/2,1mm MEAN WELL. Dostupná z: <https://www.gme.cz/napajeci-adapter-sitovy-15v-800ma-5-5-2-1mm-mean-well>
- [9] Datasheet Pigtailed Laser Diode. Dostupná z : https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1489[cit.2016-11-01]
- [10] Laserové diody.Elektrorevue[online].Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02059/index.html>[cit.2016-11-05]
- [11] Baron, R. *Principy chlazení, chladicí zařízení v průmyslu komerční bezpečnosti*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. 2012. Bakalářská práce. Ing. Lubomír Macků, Ph.D
- [12] Fyzika 007[online].Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/elektrina-a-magnetismus/elektricky-proud-v-polovodicich> [cit.2016-11-11]
- [13] Stabilizace pomocí obvodu 7805 [online].Dostupné z: <http://www.elektroportal.xf.cz/index.php?p=stabilizace-pomoci-obvodu-7805> [cit.2016-11-30]
- [14] Distrelec [online].Dostupné z: <http://www.distrelec.cz/> [cit.2016-12-05]
- [15] Datasheet Microprocessor Voltage Monitors. Dostupná z : <https://www.tme.eu/cz/Document/27e9f509db662977ecbb7f14095a7acd/MAX8211CPA+.pdf>
- [16] Datasheet LASER DIODE DRIVER IC-WK Monitors. Dostupná z : https://www.ichaus.de/upload/pdf/Wk_d1es.pdf
- [17] Datasheet LM317. Dostupná z : <https://www.tme.eu/cz/Document/e25b062a0a9863f16a3c79f09f39b1db/ltc6101aims8.pdf>

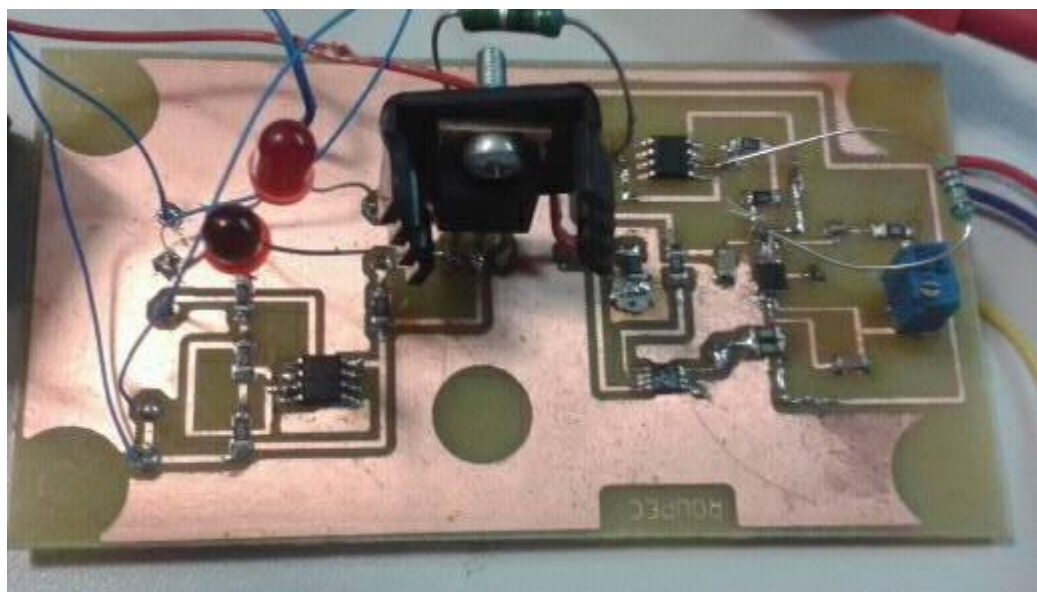
SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

| | |
|------------|--------------------------------|
| W | Energetická hladina |
| f_{01} | Frekvence absorbovaného fotonu |
| h | Planckova konstanta |
| α_m | Mezní úhel |
| n_p | Index lomu pláště |
| n_j | Index lomu jádra |
| opt. | Optický |
| LD | Laserová dioda |
| PD | Fotodioda |

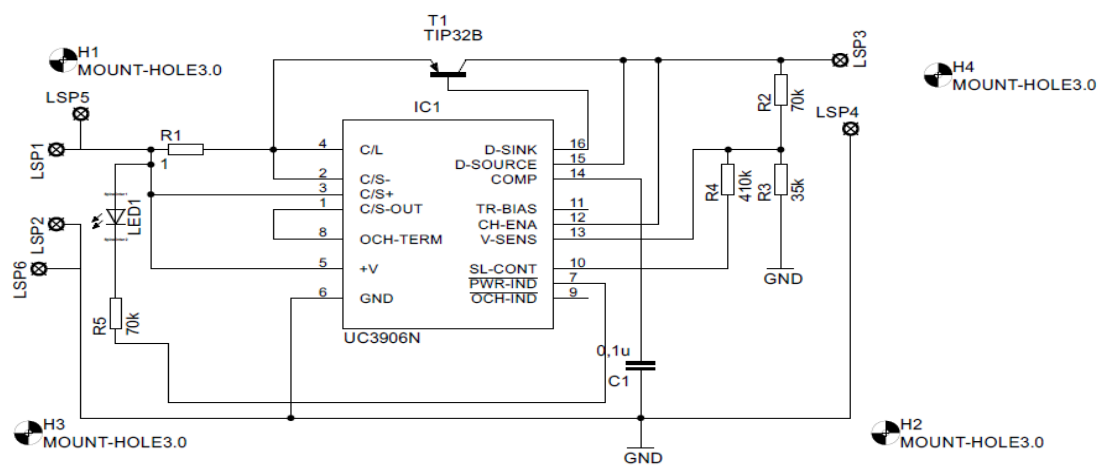
A.3 Osazení desky plošného spoje laserového budiče



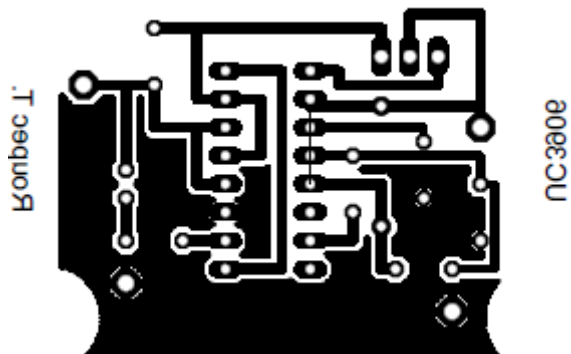
A.4 Fotka desky laserového budiče



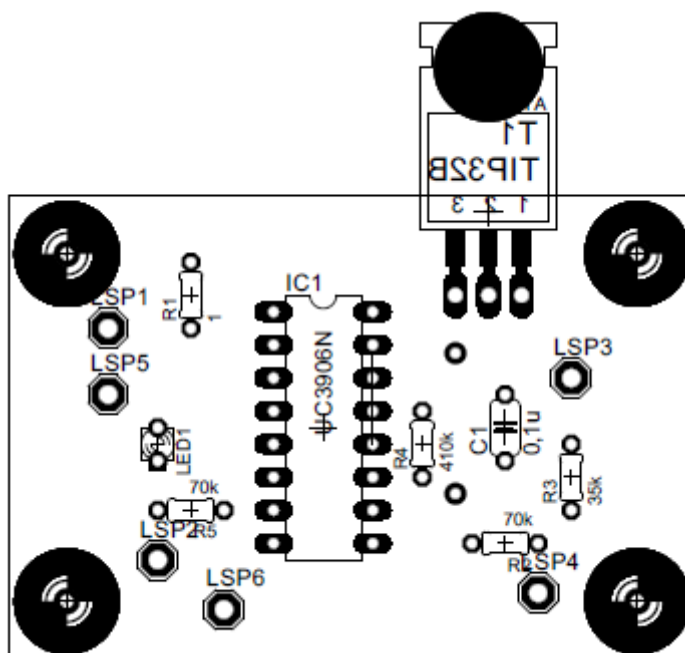
A.5 Obvodové zapojení napájení akumulátoru



A.6 Deska plošného spoje napájení akumulátoru



A.7 Osazení desky plošného spoje napájení akumulátoru



A.8 Fotka desky napájení akumulátoru



A.8 Fotka celkového zapojení zařízení

